

リニア駆動永久磁石を用いた制振制御

知能機械システム工学科

萩森 太一

竹崎 勇三

目次

- 1、 要旨
- 2、 はじめに
- 3、 実験装置
- 4、 システムのモデリング（モデル化）
 - 4 - 1、システム入力永久磁石の位置による場合
 - 4 - 2、システム入力アクチュエータの駆動力による場合
- 5、 数値シミュレーション
 - 5 - 1、コントローラ
 - 5 - 2、システム入力永久磁石の位置
 - 5 - 3、システム入力アクチュエータの駆動力
- 6、 おわりに
- 7、 参考文献、資料

1、要旨

これから記す文章は新しい制振制御方法について述べている。この方法の示差的特徴はリニアアクチュエータ (linear actuator) と永久磁石 (permanent magnet) を使っていることである。リニアアクチュエータは永久磁石を動かして吸引力制御 (attractive force control) しながら永久磁石と対象物間のエアギャップ (air gap) の変化を通して振動を縮小するために使われる。提案した制振制御方法 (vibration control method) の性能について考察するために、実際の実験装置 (experimental system) を基にモデル化したシステムを考える。そして、数値シミュレーション (numerical simulation) を実行して提案した制御方法の有効性を決定した。

2、はじめに

薄板鋼板の圧延、コーティング、そしてメッキ工程では、その鋼板の搬送の際に生じる振動 (vibration) がしばしば問題となっている。薄板鋼板はとても変形しやすい。そのための対策として、機械接触で振動を抑制する方法がある。しかし、その方法では機械接触により、鋼板に損傷を加えてしまう可能性があるため、適している方法ではない。それゆえに、非接触で振動を抑制する機械装置が薄板鋼板にとってもっとも適している方法といえる。この非接触での制振制御方法の1つとして、電磁石の磁気力を用いて振動を制御するという試みが行われている。しかし、この制御方法に問題点がある。それは制御範囲が収縮されることである。なぜなら磁石の吸引力はエアギャップの2乗に反比例して変化するためである。要するに、鋼板と電磁石の距離が離れると、十分な制御力が得られなくなることを意味する。もし対象物の振動振幅 (vibration amplitude) が大きくなると、電磁石を使用しての対象物を制御することは不可能になる。

そこで、別の方法として永久磁石とリニアアクチュエータを用いての制振制御方法を提案する。提案した方法は力制御機構 (force control mechanism) であるところがキーポイントとなっている。リニアアクチュエータは永久磁石を動かし、磁石と対象物間のエアギャップを変化させる。エアギャップの大きさの変化量は磁石の吸引力で変化する。制御範囲はアクチュエータの可動範囲とほぼ同じであるので、制振制御範囲が広いということが期待できる。

流れとして、提案した方法の実験装置の概要を表して、システムのモデリング (modeling) をする。

次に、システムを線形制御理論 (linear control theory) に合わせて解析して、制御器 (controller) をその結果を元に設計する。その後、数値シミュレーション (numerical simulation) を行う。シミュレーションは制御方法の特性とその可能性を証明するために行う。

3、実験装置

提案した制振制御方法の性能を考察するために実験装置を考案した。実験装置の画像を図1に示す。また、真上から見た実験装置の概略図を図2に示す。

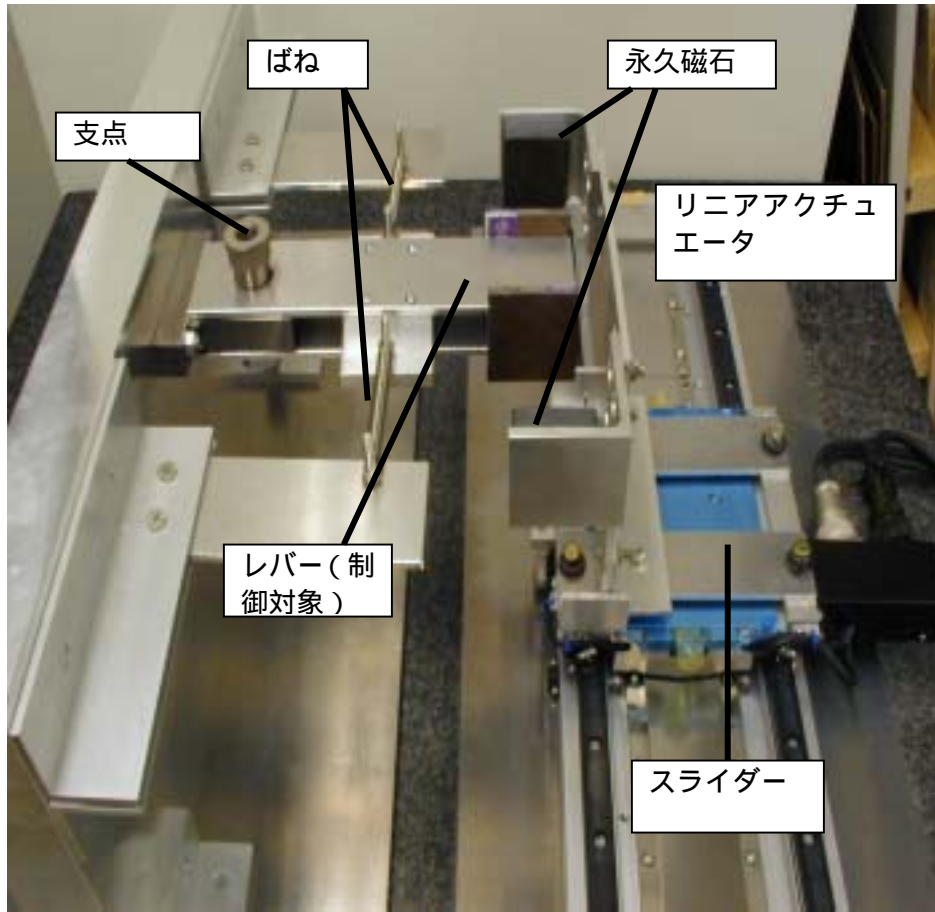


図1：実験装置の画像

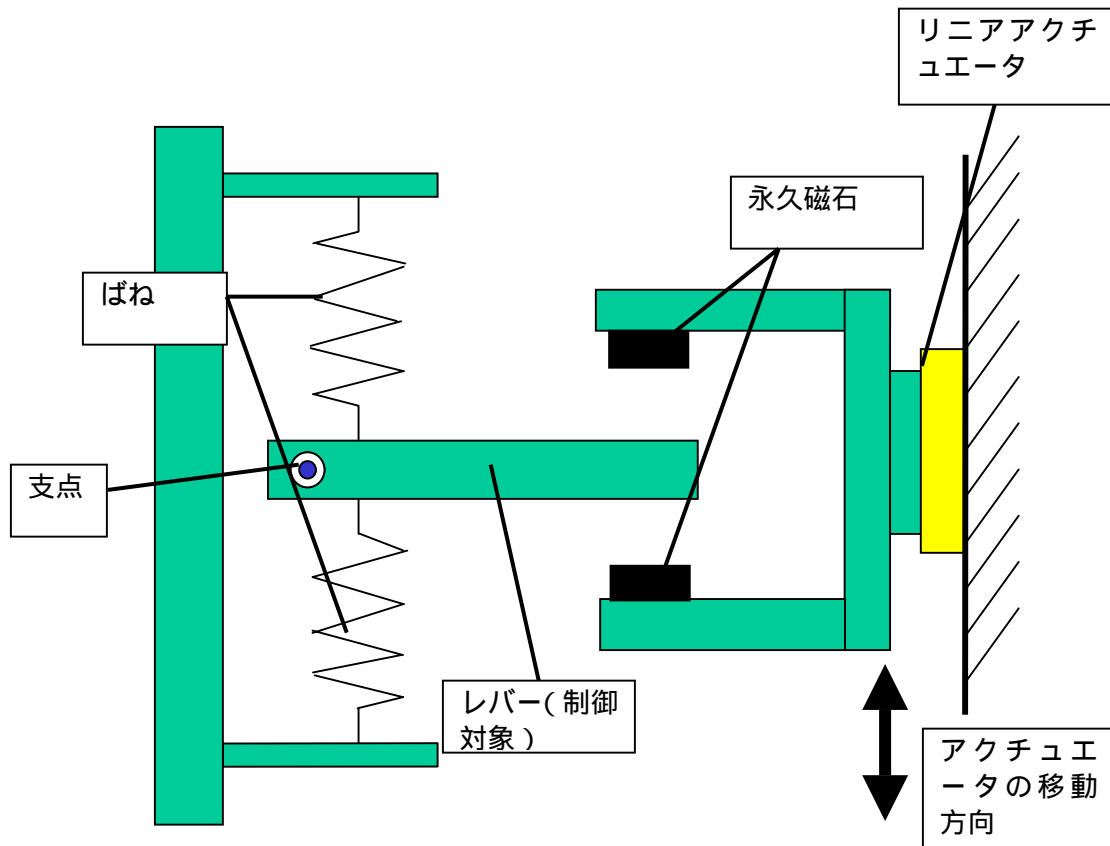


図 2：真上から見た実験装置の概略図

対象とするシステムは、図 1、図 2 に示すような 1 自由度の振動系である。対象物（レバー）は回転の自由度を持つもので、2 つのばねによって支持されている。それらのばねは交換できて任意の剛性を決められる。対象物は強磁性体（磁石に吸着する物質）として、リニアアクチュエータで動いている 2 つの永久磁石によってその両側から永久磁石の吸引力を加えられるような構造となっている。2 つの鉄板が対象物（レバー）に取り付けられており、それらの鉄板は向き合っている 2 つの永久磁石の吸引力がレバーに作用する位置にある。図 2 から見て永久磁石はリニアアクチュエータによって上下に駆動するが、実際はリニアアクチュエータのレール部分は水平に取り付けているので、アクチュエータは水平方向に移動する。図から見て上側の永久磁石が薄板鋼板に近い位置にいて、右側の永久磁石が離れた位置にいるとき、上側の磁石の力を発生させる。同じく、下側の磁石の力も発生させることができる。この力制御機構は磁気浮上装置（magnetic levitation system）でも提案されているものである。

薄板鋼板の振動を制御するための計略は以下のとおりである。

センサ（sensor）が薄板鋼板の変位（displacement）を計測する。

センサの情報量を基にして、コントローラが振動を抑制するために必要とさせる力を計算する。この力は永久磁石を動かしてエアギャップの大きさを調整することによって発生させる。リニ

アクチュエータはNSKによって製造されたメガスラストモータと呼ばれるものでリニアDDモータ (Direct Drive motor) 式である。アクチュエータのストロークの長さは400mm、最高速度は1800mm/s、そして0.001mmの精度を持つ。永久磁石は(株)マグナ製の異方性フェライト磁石 (Anisotropic Sr-Ferrite magnet) で、縦50mm、横50mm、幅18mmの正方形型のものを使用し、制御対象の部分にある鋼板、鉄板、そしてばね等の図2に映っている部材は(株)ミスミで注文したものを使用している。

4、システムのモデリング (モデル化)

モデリング (モデル化) とは制御理論を用いて制御系設計するために、制御対象を運動方程式とか状態方程式のような数学モデルで表すことをいう。実験装置のモデル化は安定性 (stability) の確認、フィードバックゲイン (feedback gain) の計算、そして数値シミュレーションを可能にする目的で必要とされる。図3にシステムのモデル図を示す。制御対象は回転運動を行うものであるが、簡単のために直線運動をするものとしてモデル化する。明確な運動方向は図3から見て上向き方向を示す。

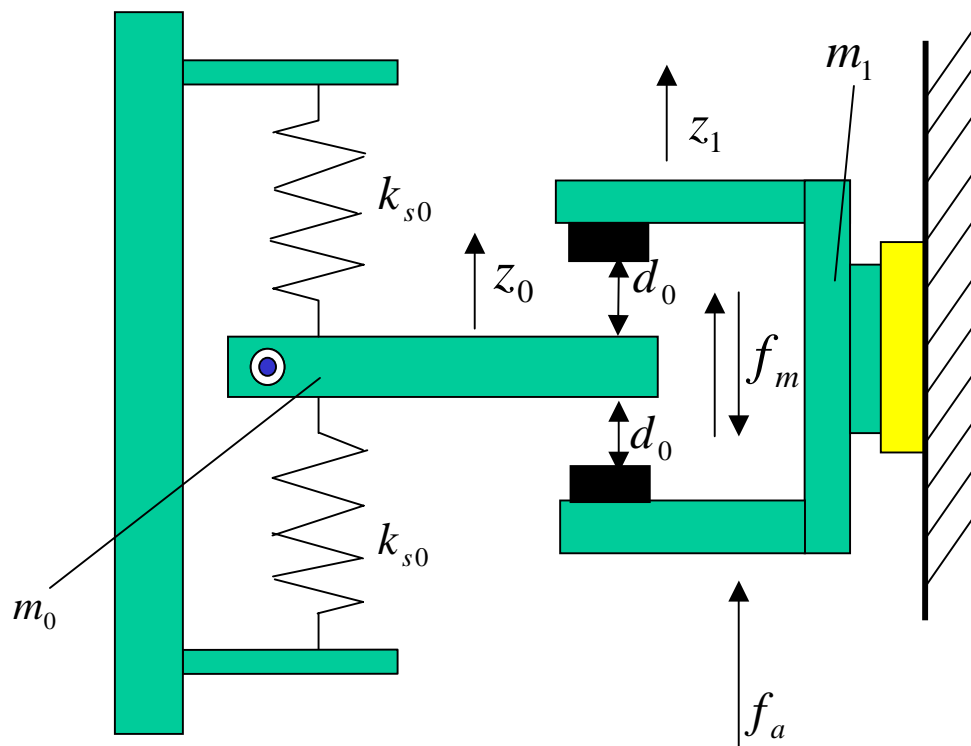


図3：システムのモデル図

解析に用いる記号とその説明は以下のとおりである。

そのモデルに用いる記号の説明

z_0 : 対象物（レバー）の変位

z_1 : 永久磁石部の変位

d_0 : 平衡状態のエアギャップ（対象物が磁石の間の中心にあるときのエアギャップ）

k_{s0}, k_{s1} : ばね定数

k_{c0}, k_{c1} : 減衰係数

m_0 : 対象物の換算質量

m_1 : 永久磁石と動作部の質量

f_m : 永久磁石の吸引力

f_a : アクチュエータの駆動力

k : 永久磁石の定数

図3の上方向を正とする。

永久磁石の吸引力は

$$f_m = \frac{k}{(d_0 - z_0 + z_1)^2} - \frac{k}{(d_0 + z_0 - z_1)^2} \dots \dots \dots (1)$$

対象物（レバー）の運動方程式は

$$m_0 \ddot{z}_0 = f_m - k_{s0} z_0 - k_{c0} \dot{z}_0 \dots \dots \dots (2)$$

また、永久磁石部の運動方程式は

$$m_1 \ddot{z}_1 = -f_m - k_{s1} z_1 - k_{c1} \dot{z}_1 + f_a \dots \dots \dots (3)$$

となる。

永久磁石の吸引力 f_m は非線形であるから、線形化する必要がある。尚、線形化(linearization)とは非線形方程式を線形方程式で近似することをいう。

式(1)を線形化すると

$$f_m = k_m z_0 - k_m z_1 \dots \dots \dots (4)$$

となる。ここで、 k_m は永久磁石の定数である。

式(4)を式(2)に代入して変形すると

$$m_0 \ddot{z}_0 = (k_m - k_{s0})z_0 - k_{c0}\dot{z}_0 - k_m z_1 \cdots \cdots \cdots (5)$$

同様に、式(4)を式(3)に代入して変形すると

$$m_1 \ddot{z}_1 = -k_m z_0 + (k_m - k_{s1})z_1 - k_{c1}\dot{z}_1 + f_a \cdots \cdots \cdots (6)$$

となる。さらに、式(5)、(6)を変形すると、それぞれ

$$\ddot{z}_0 = \left(\frac{k_m - k_{s0}}{m_0} \right) z_0 + \left(-\frac{k_{c0}}{m_0} \right) \dot{z}_0 + \left(-\frac{k_m}{m_0} \right) z_1 \cdots \cdots \cdots (7)$$

$$\ddot{z}_1 = \left(-\frac{k_m}{m_1} \right) z_0 + \left(\frac{k_m - k_{s1}}{m_1} \right) z_1 + \left(-\frac{k_{c1}}{m_1} \right) \dot{z}_1 + \frac{f_a}{m_1} \cdots \cdots \cdots (8)$$

となる。

そのシステムモデルは、

4 - 1、システム入力永久磁石の位置による場合

4 - 2、システム入力アクチュエータの駆動力による場合

の2つの場合に分けて考察する。

以下ではそれぞれについて線形制御理論から、線形化した状態方程式 (state equation) を求め、システムの特性を把握する。

4 - 1、システム入力永久磁石の位置による場合

システム入力永久磁石の位置による場合、そのモデルは式(1)、(2)を使うことによって表される。システム入力は永久磁石の位置、出力は対象物 (レバー) の変位である。そのシステムのブロック線図 (block Diagram) を図4に示す。

$$\begin{pmatrix} \dot{z}_0 \\ \ddot{z}_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ k_m - k_{s0} & -\frac{k_{c0}}{m_0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_0 \\ \dot{z}_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{k_m}{m_0} \end{pmatrix} z_1 \dots \dots \dots (11)$$

ゆえに

$$\dot{x}_1 = A_1 x_1 + B_1 u_1 \dots \dots \dots (12)$$

ここで、 $A_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ k_m - k_{s0} & -\frac{k_{c0}}{m_0} \end{pmatrix}$, $B_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{k_m}{m_0} \end{pmatrix}$,

入力 $u_1 = z_1$

である

出力方程式は

$$y = (1 \ 0) \begin{pmatrix} z_0 \\ \dot{z}_0 \end{pmatrix} \dots \dots \dots (13)$$

ゆえに

$$y = C_1 x_1 \dots \dots \dots (14)$$

ただし、 $C_1 = (1 \ 0)$
である。

状態方程式から可制御性、可観測性の判定をする。判定方法は行列の対角化の方法と可制御行列、可観測行列を利用する方法の2通りある。今回は可制御行列、可観測行列を利用する方法で判定する。

可制御行列は

$$V_{c1} = [B_1 \ A_1 B_1] \dots \dots \dots (15)$$

ゆえに

$$V_{c1} = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{k_m}{m_0} \\ -\frac{k_m}{m_0} & \frac{k_{c0} k_m}{m_0^2} \end{pmatrix} \dots \dots \dots (16)$$

だから

$$\det[V_{c1}] = -\left(\frac{k_m}{m_0}\right)^2 \cdot \dots \cdot (17)$$

となる。

次に、可観測行列は

$$V_{o1} = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_1 A_1 \end{bmatrix} \cdot \dots \cdot (18)$$

ゆえに

$$V_{o1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \dots \cdot (19)$$

だから

$$\det[V_{o1}] = 1 \cdot \dots \cdot (20)$$

となる。

可制御の条件は $\det[V_{c1}] \neq 0$ 、可観測の条件は $\det[V_{o1}] \neq 0$ だから式(17)、(20)は条件を満たしている。よって、このシステムは可制御で可観測であるので、フィードバック制御によって安定化可能であると言える。

4 - 2、システム入力アクチュエータの駆動力による場合

システム入力アクチュエータの駆動力による場合、そのモデルは式(1)、(2)、(3)によって表される。システム入力はアクチュエータの駆動力、出力は対象物（レバー）と磁石の変位である。そのシステムのブロック線図を図5に示す。

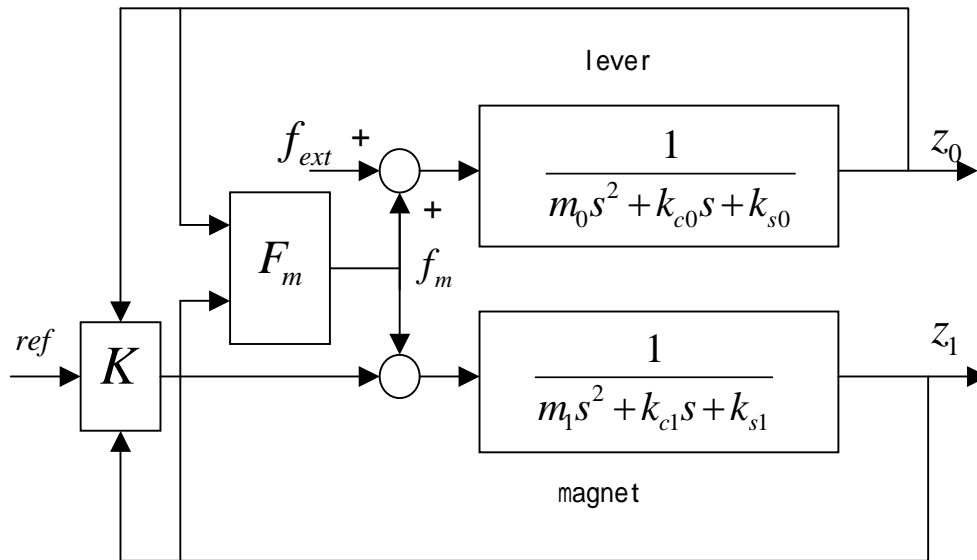


図5：システム入力アクチュエータの駆動力のときのブロック線図

図5にあるように、外力 f_{ext} は対象物（レバー）に対しての力の加え合わせ点から加わる形となる。アクチュエータのスライダは能動制御を必要としないシステム用の安定で十分な剛性を持つばねによって支持されていると仮定した。よって、そのばねは図2から省略した。式(7)、(8)を線形制御理論で利用できるモデルに変換するため、状態量を定める。

状態ベクトルは

$$x_2 = \begin{pmatrix} z_0 \\ \dot{z}_0 \\ z_1 \\ \dot{z}_1 \end{pmatrix} \dots \dots \dots (21)$$

このベクトルを時間で微分すると

$$\dot{x}_2 = \begin{pmatrix} \dot{z}_0 \\ \ddot{z}_0 \\ \dot{z}_1 \\ \ddot{z}_1 \end{pmatrix} \cdots \cdots \cdots (22)$$

となる。このベクトルの第2、第4要素の加速度に対して、式(7)、(8)を代入して、行列を用いて表すと状態方程式は

$$\begin{pmatrix} \dot{z}_0 \\ \ddot{z}_0 \\ \dot{z}_1 \\ \ddot{z}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{k_m - k_{s0}}{m_0} & -\frac{k_{c0}}{m_0} & -\frac{k_m}{m_0} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_m}{m_1} & 0 & \frac{k_m - k_{s1}}{m_1} & -\frac{k_{c1}}{m_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_0 \\ \dot{z}_0 \\ z_1 \\ \dot{z}_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{m_1} \end{pmatrix} f_a \cdots \cdots (23)$$

ゆえに

$$\dot{x}_2 = A_2 x_2 + B_2 u_2 \cdots \cdots (24)$$

ここで、 $A_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{k_m - k_{s0}}{m_0} & -\frac{k_{c0}}{m_0} & -\frac{k_m}{m_0} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_m}{m_1} & 0 & \frac{k_m - k_{s1}}{m_1} & -\frac{k_{c1}}{m_1} \end{pmatrix}$, $B_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{m_1} \end{pmatrix}$,

入力 $u_2 = f_a$

である。

出力方程式は

$$y = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_0 \\ \dot{z}_0 \\ z_1 \\ \dot{z}_1 \end{pmatrix} \cdots \cdots \cdots (25)$$

ゆえに

$$y = C_2 x_2 \cdots \cdots (26)$$

$$G_{pre} = \frac{1}{Ts+1} \dots \dots \dots (30)$$

(T : 時定数)

のような1次系が与えられる。
システム入力がアクチュエータの駆動力のフィードバック命令は

$$f_a = -(k_{p0}z_0 + k_{d0}\dot{z}_0 + k_{p1}z_1 + k_{d1}\dot{z}_1) \dots \dots \dots (31)$$

ここで、 $k_{p0}, k_{d0}, k_{p1}, k_{d1}$ はフィードバックゲインである。

シミュレーションで用いたパラメータは以下のとおりである。
 $m_0 = 1, m_1 = 3, d_0 = 0.1, k_{s0} = 70, k_{c0} = 0.1, k_{s1} = 200, k_{c1} = 0.7, k = 0.01$

5 - 2、システム入力が永久磁石の位置

シミュレーションはレバーが自由に振動するように最初にレバーの変位を0.01に合わせて実行した。そして、1秒後に能動的に制振制御を始める。永久磁石の位置は ± 0.04 で最大をとると仮定する。フィードバックゲインは $k_p = -9.28, k_d = -0.68$ とする。

遅れないシステムで伝達関数 $G_{pre} = 1$ (時定数： $T = 0$) のときの結果を図6に示す。

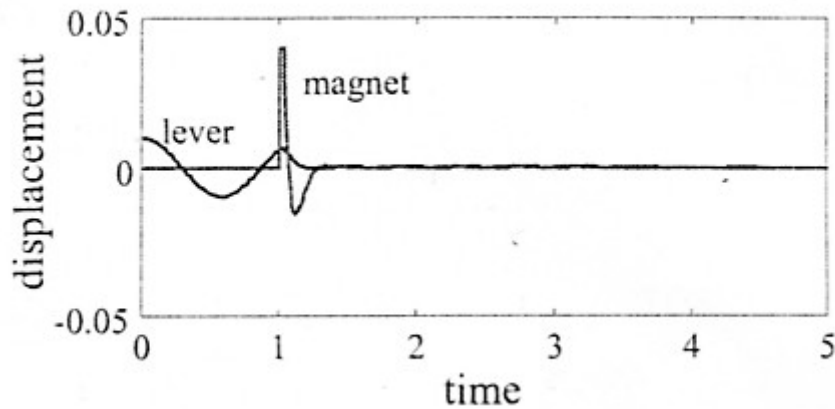


図6：シミュレーション結果（位置入力、 $G_{pre} = 1$ ）

図6はレバーと永久磁石の動きを記録している。図に示すように、振動は能動的制御後に急速に抑制されている。

図7に伝達関数 $G_{pre1} = \frac{1}{0.06s+1}$ (時定数: $T = 0.06$) と $G_{pre2} = \frac{1}{0.07s+1}$ (時定数: $T = 0.07$) の結果を示す。

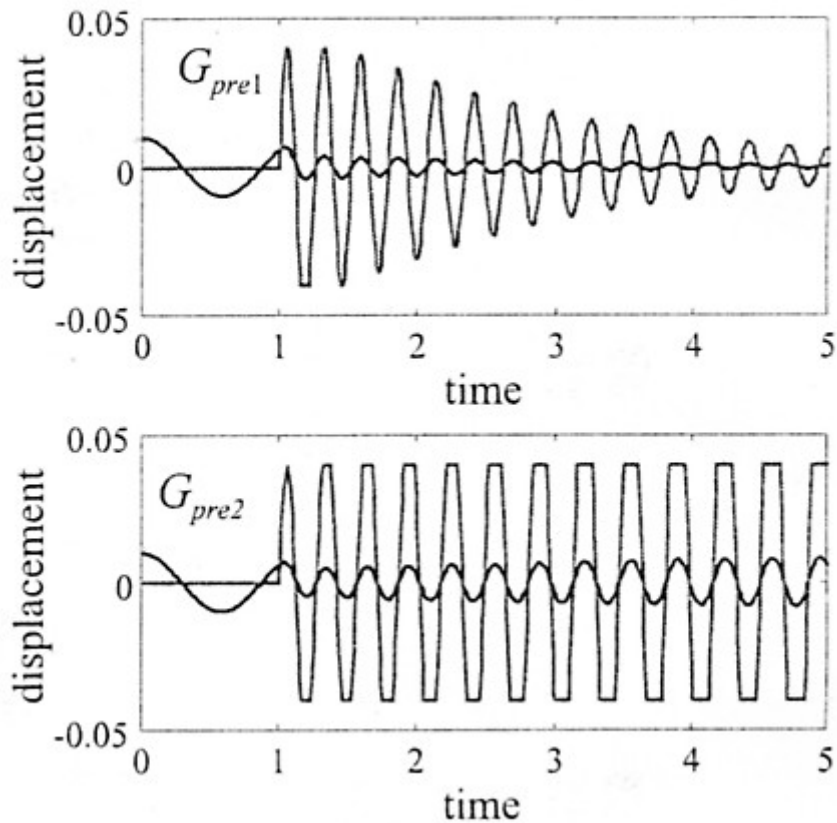


図7 : シミュレーション結果 (位置入力、 $G_{pre1} = \frac{1}{0.06s+1}$ と $G_{pre2} = \frac{1}{0.07s+1}$)

上側の図は G_{pre1} で、下側の図は G_{pre2} のときを示す。これらの図に示されるように、時間遅れでより不安定なシステムになる。

次にシステムへの定量化した入力の結果を考察する。デジタルコントローラは定量化した値を出力する。これはシステム安定には適していないので、許容誤差を知っておく必要がある。制御入力は0.01間隔で定量化している。その値は比較的に大きな値である。その結果を図8に示

す。

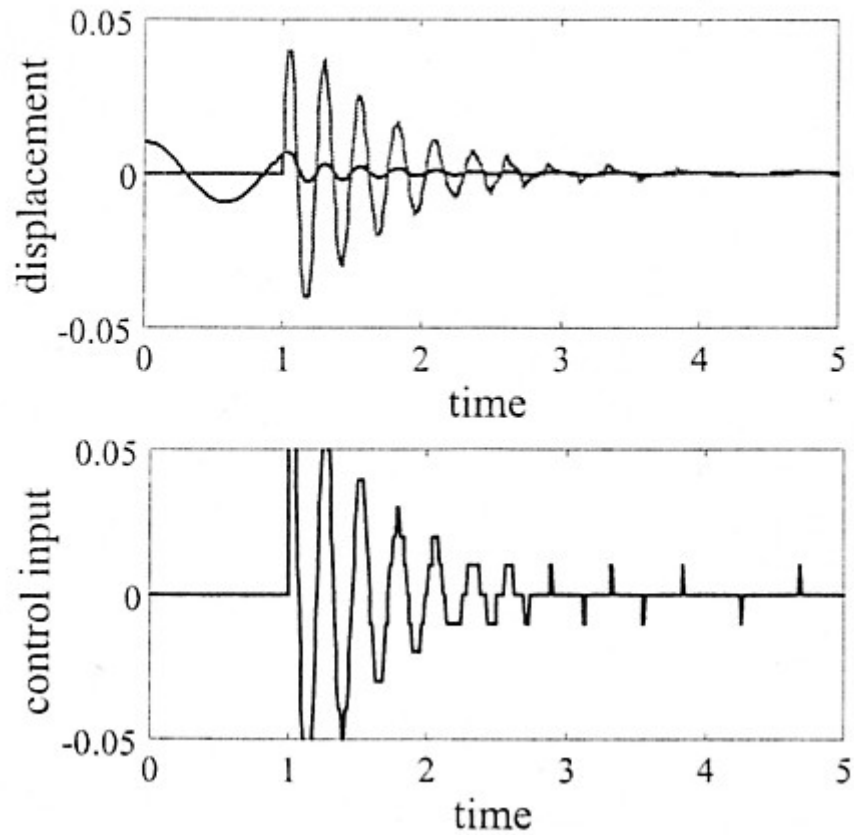


図8 : シミュレーション結果 (位置入力、 $G_{pre} = \frac{1}{0.05s+1}$ 、定量化した入力)

図に示されるように、もし制御入力が定量化した値を持つなら安定性を維持できる。

デジタルコントローラは一定時間間隔でサンプリング (アナログ信号のデジタル変換) した離散値を出力する。サンプリング時間が0.005、伝達関数は $G_{pre} = \frac{1}{0.05s+1}$ とするときの結果を図9に示す。

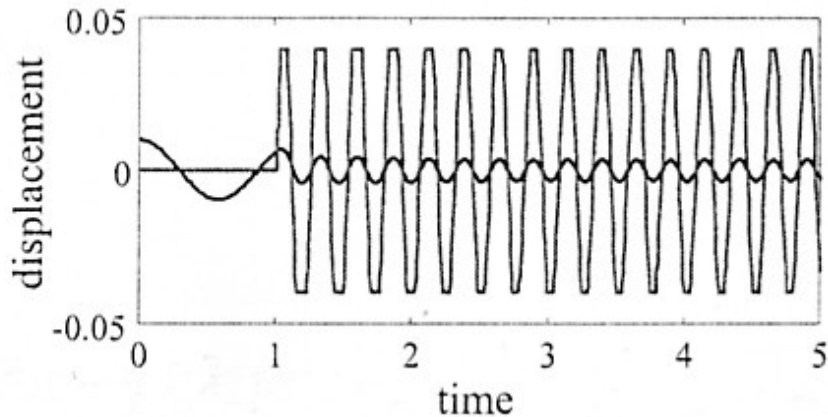


図9：シミュレーション結果（位置入力、 $G_{pre} = \frac{1}{0.05s+1}$ 、サンプリング時間 = 0.005）

図から見られるように、このシステムは安定である。サンプリング時間が0.01のときの結果では不安定となる。したがってサンプリング時間は安定変数 (stability variable) である。ちなみに、サンプリングとはアナログ信号のデジタル変換のことで、A/D変換器で行う。逆に、デジタル量からアナログ量へ変換するのはD/A変換器で行う。それは制御対象がほとんどすべての場合アナログの連続信号で表される。これに対してデジタルコンピュータは信号を離散的にしか扱えないので、制御対象とコントローラの間で信号を変換する必要がある。

5 - 3、システム入力アクチュエータの駆動力

このシミュレーションはシステム入力永久磁石位置のときのシミュレーションと同様のやり方で実行した。レバーが自由に振動するように最初にレバーの変位を0.01に合わせる。しかしながら、このシミュレーションでは磁石がさらにレバーと調和して振動する。3秒後に、能動的に制振制御を始める。その結果を10秒間記録した。アクチュエータの駆動力は ± 0.4 で最大をとると仮定される。

フィードバックゲインは $k_{p0} = 21.8, k_{d0} = -4.77, k_{p1} = 29.9, k_{d1} = 12.7$ としてLQ制御理論（線形2次形式制御理論）から計算した。連続的な制御の結果を図10に示す。

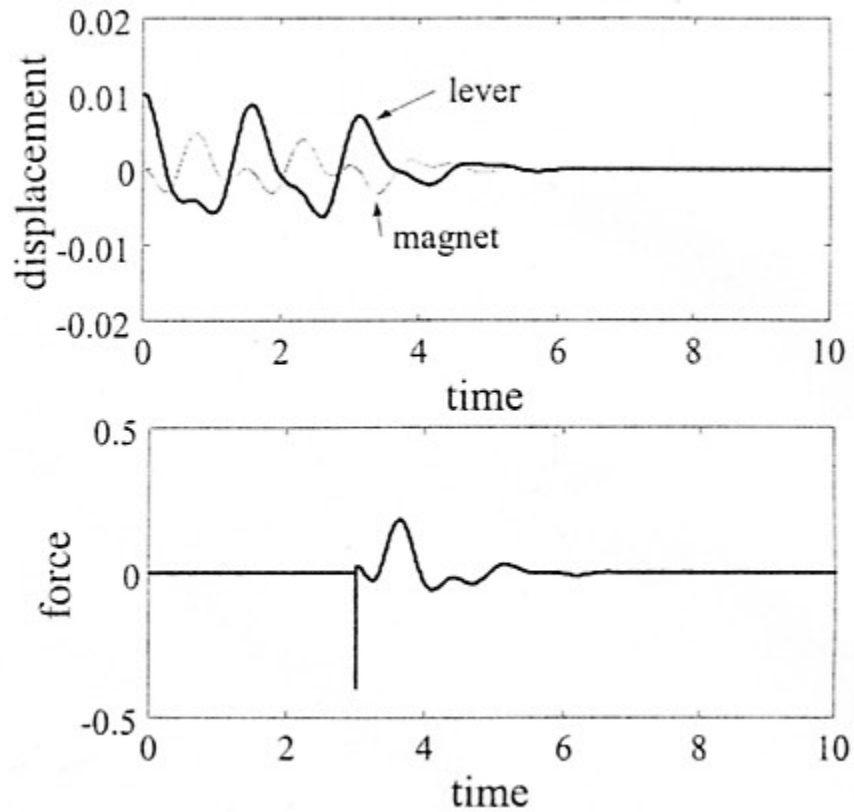


図 1 0 : シミュレーション結果 (入力 は アクチュエータ の 駆動力)

上側の図はレバーと磁石の変位、下側の図はアクチュエータの駆動力を示す。レバーの位置の初期誤差はレバーと磁石の両方の振動を引き起こすことが観測される。能動制御後に、振動が始点に集中している。

アクチュエータの駆動力が0.05の間隔で定量化した値を持つときの結果を図 1 1 に示す。

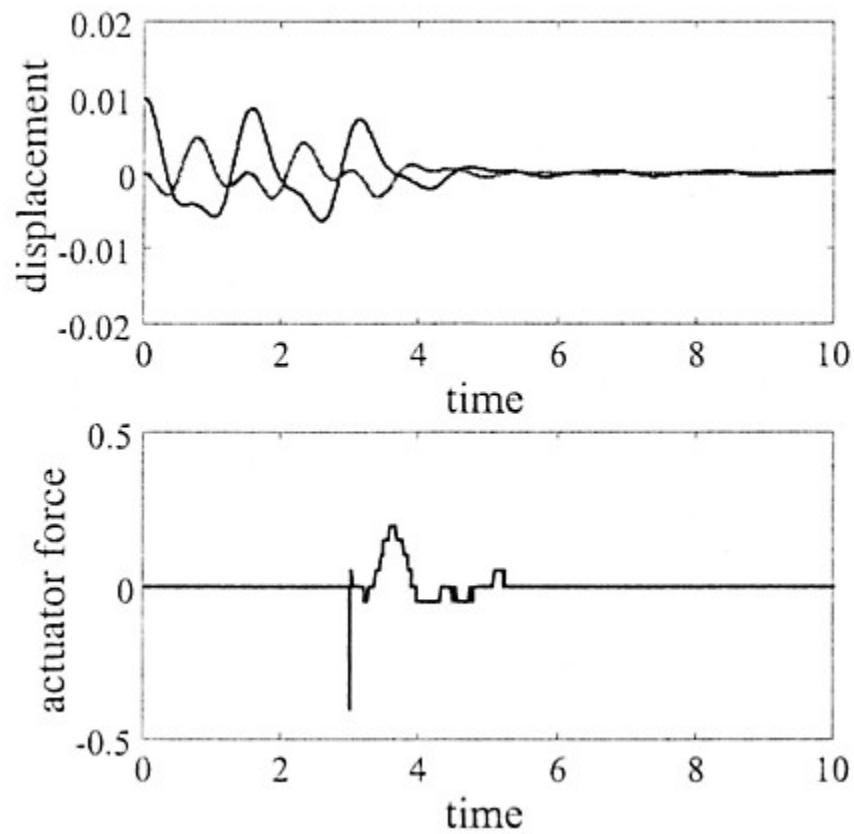


図 1 1 : シミュレーション結果 (定量化した力の入力)

上側の図は磁石とレバーの変位、下側の図はアクチュエータの駆動力を示す。アクチュエータの駆動力を示す図の方に示されるように、その駆動力は階段関数で変化している。これは0.05の間隔は比較的大きいので、システムは始点に集中している。しかしながら、少しの振動が観測されている。その理由は定量化した入力が振動を制御できていないということである。フィードバックゲインの調整によって振動の振幅を改善することができる。

アクチュエータの駆動力が離散化と定量化した力の入力の際の結果を図 1 2 に示す。

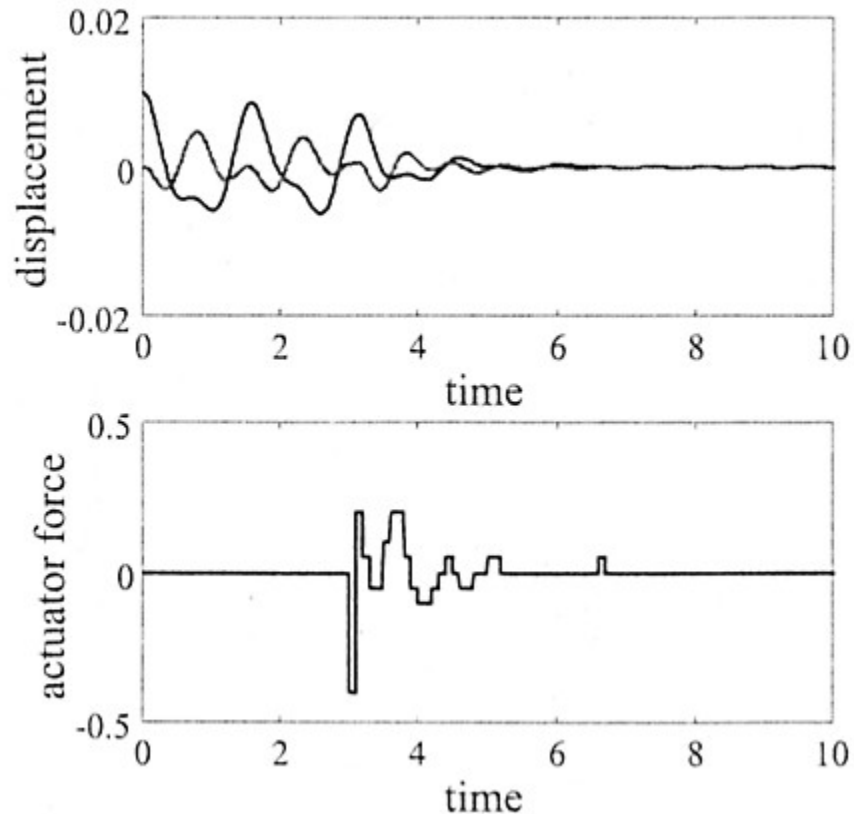


図 1 2 : シミュレーション結果 (離散化と定量化した力の入力)

上側の図は磁石とレバーの変位、下側の図はアクチュエータの駆動力を示す。サンプリング時間は0.1である。このサンプリング時間は位置入力システムのと比べて大きい。システムを安定させるために永久磁石部を支持しているばねはシステムの安定性に影響すると思われる。

6、おわりに

リニアアクチュエータと永久磁石を使う新しい制振制御方法を提案した。制振システムを2種類のシステム入力でモデル化した。両方のモデルが可制御で可観測であることを確認した。それらの数値シミュレーションから、位置、駆動力の両方のシステムが振動を抑制することができることを証明した。アクチュエータの力制御システムは磁石の位置制御システムよりロバスト性(エラー強さ)があることを示した。システムに対する時間遅れの問題は磁石の位置制御システムモデルにとって、特にシステムを安定させるときの主要な要因だった。アクチュエータの位置遅れを予測する重要性を証明した。今後は実際に制振制御実験をして、実験結果とシミュレーション結果の比較をしていく。

7、参考文献、資料

- 1、パソコンで解く振動の制御 著者：背戸一登、松本幸人
- 2、フィードバック制御入門 著者：杉江俊治、藤田政之
- 3、SHINKO ELECTRIC CO.LTD. URL: http://www.shinko-elec.co.jp/NewsRelease/new_18.htm
- 4、現代制御工学 著者：土谷武士、江上正共
- 5、機会力学 著者：原文雄
- 6、配布資料1 著者：岡宏一
- 7、配布資料2 著者：岡宏一
- 8、永久磁石の運動制御による磁気浮上機構 著者：岡宏一
- 9、MATLAB/Simulinkによるわかりやすい制御工学 著者：川田昌克、西岡勝博